

# 超音波でインフラ構造物のストレスを 壊さずに測る

## NONDESTRUCTIVE STRESS MEASUREMENT OF INFRASTRUCTURE CONSTRUCTIONS BY ULTRASONIC WAVE

村田 頼信<sup>1</sup>・藤垣 元治<sup>2</sup>  
Yorinobu MURATA and Motoharu FUJIGAKI

<sup>1</sup>システム工学部准教授, <sup>2</sup>福井大学教授

人は健康を害したりストレスを感じたりすると、すぐに顔色に出るため他人が気づいてくれる。しかし、橋梁や鉄塔などのインフラ構造物は、力の不均衡や局所的な負荷などによって健全性を欠いても、その様子がすぐに表には現れることがない。そのため、地震や突風などによる自然災害が発生したときに、想定外の事故が発生することがある。したがって、常日頃から、これらの構造物の健全状態を把握してメンテナンスを行い、安全に供用することが大切である。供用中の構造物の健全性を比較的簡便かつ安全に調べる方法の一つとして超音波を使った測定技術がある。ここでは、鉄鋼構造物のメンテナンスに着目し、超音波を使った非破壊検査技術を取り上げる。そして、構造物に働くストレス（応力）を超音波によって非破壊で計測する音弾性技術を概説する。また、著者がこれまで取り組んできた防災に関わる鉄鋼構造物の応力測定の例について紹介する。

**キーワード：**超音波, インフラ, 鉄鋼構造物, ストレス（応力）, 非破壊計測, 音弾性

### 1. はじめに

表-1 社会資本の老朽化の現状<sup>2)</sup>。

現在、我々の生活は、道路や鉄道などの交通、発電や送電、それにトンネルやビルといった社会基盤構造物（いわゆるインフラ構造物）と大きく関わっている。これらの構造物は、適切な管理が行われないまま過酷に供用されると、設計当初で想定していた以上の負荷がかかることによって劣化が進行し、崩壊や破損といった事故につながる可能性がある。構造物の老朽化による倒壊事故として、笹子トンネルが崩壊する事故が記憶に新しい。これは、天井板を支えるアンカーボルトの点検不足から老朽化が進み、耐えきれぬ負荷を越えたことが原因として挙げられている<sup>1)</sup>。日本国内のインフラ構造物は、1960年代から1980年代にかけてのいわゆる高度経済成長期に集中的に建設された。これらの構造物の寿命は一般的に50年と言われており、この年数を超えるインフラ構造物の数は今後加速度的に増えることになる。国土交通省は、表-1に示すように、代表的なインフラ構造物の老朽化についての最新の調査結果を平成26年度国土交通白書で公表している<sup>2)</sup>。これを見ると、例えば橋梁では、長さ2メートル以上の橋梁は平成25年の時点で約70万橋（長さが15メートル以上だと、約15万5000橋）あり、そ

	平成25年3月	35年3月	45年3月
道路橋 (橋長2m以上)	約18%	約43%	約67%
トンネル	約20%	約34%	約50%
河川管理施設 (国管理の水門等)	約25%	約43%	約64%
下水道管きよ	約2%	約9%	約24%
港湾岸壁 (水深4.5m 以深)	約8%	約32%	約58%

のうち建設後50年以上が経過したものは約18%を占めている。それが10年後の平成35年に約43%、20年後の平成45年にはなんと約67%と半数を超える橋梁が寿命を迎える。ここで、国内の橋梁のうち60%近くの橋は市町村道にあるものであることに注意したい。和歌山県でも、県が管理している橋梁約2,400橋のうち、2018年には建設後50年を超える橋梁の割合は50%以上となる<sup>3)</sup>。これらは、最近になってようやく点検が進んできたものの、自治体の予算不足や維持管理の知識の欠如で管理が十分に行き届いていないのが現状である。一方、水門に代表される河川監視施設における老朽化の割合も平成25年から45年までの20年間にかけて約25%から約62%へと急増し

ており、橋梁以外のインフラ構造物でも老朽化の波が押し寄せていることがわかる。このような状況の中で、国土交通省では、平成25年を「社会資本メンテナンス元年」と位置づけ、国を挙げてのインフラ構造物の老朽化対策に取り組むための体制作りを図っている。平成26年5月に決定された「国土交通省インフラ長寿命化計画（行動計画）」によると、定期的なメンテナンス（修繕・更新）やメンテナンスコストの縮減などを掲げている。従って、より簡便な検査技術の開発が必要不可欠となっている。このような技術によって普段からインフラ構造物の健全性が維持されれば、今後近い将来必ず起こるとされている南海トラフ地震が起こった場合でも倒壊を未然に防ぐことができ被害を最小限にできると考える。ここでは、検査対象物を壊さずに内部の健全性が評価可能な超音波検査技術を取り上げる。中でも外見上では評価が困難な鉄鋼インフラ構造物内部のストレス（応力）を非破壊で計測可能な音弾性について、その原理と応用例について概説する。

## 2. 超音波検査技術

超音波は人の耳には聞こえない約20kHz以上の高周波の音を指している。超音波は目では見えない物体内部の情報を検出する手段の一つとして使え、以下に示す特徴を有することから、現在では、医療や工業など様々な分野で検査を目的とした活用がなされている。

- (a) 固体、液体、気体といったあらゆる物質中を伝わる。
- (b) 電磁波に比べ超音波の伝搬速度が遅く、そのため同じ周波数であれば波長が短い。つまり、指向性を鋭く、そして伝搬方向の分解能を高くすることができる。
- (c) 液体や固体中では、電磁波に比べ減衰が小さい。
- (d) 放射線と比べ、人体に対し非侵襲、つまり取り扱い

いが容易である。

また、超音波の主な性質として、

- ① 音響インピーダンス（密度と伝搬速度の積）の異なる界面で反射する。
- ② 伝搬媒体の密度や弾性率の大きさに依存してその媒体における音速が変化する。

がある。例えば、①の性質を利用して、材料内のき裂や異物など欠陥検出が行われている。欠陥からの反射波を捕らえると、伝搬時間から欠陥の大きな位置を、そして、反射波の振幅から欠陥の大きさや種類を推定することが可能である。一方、②の性質は、材料の異方性や疲労、それに応力など、被検体の特性評価に利用することができる。

超音波を用いた検査システムの開発にあたっては、これらの性質を利用することはもちろんであるが、表-2に示すように、用途に応じて検査方法や超音波の種類を選択し使い分ける必要がある。ここで、垂直法とは、検査対象表面に対し垂直に超音波を入射する方法であり、斜角法は角度を付けて入射する方法である。また、縦波は、波の進行方向と振動方向が同じ波であり、あらゆる物体中を伝わる。一方、横波は、波の進行方向と振動方向が互いに直交しており、固体のみを伝わる。また、表面波は臨界角で検査対象表面に超音波を入射したときにその面に沿って伝搬する波であり、板波とは通称ガイド波とも呼ばれ二つの境界面内で反射を繰り返しながら比較的遠方まで伝わる波の総称である。このような波の性質を十分理解した上で、検査対象物の形や構造、それに検査目的に応じて、反射法や透過法といった検出方法や超音波発生方法も選択しなければならない。例えば、超音波を送・受信する場合、圧電効果を利用した超音波探触子を用いるのが一般的である。圧電効果とはある物質に圧力を加えると圧力に比例した表面電荷が現れる現象であり、このような性質をもつ物質は逆に電界を印加すると物質が変形する逆圧電効果を有している。圧電効果を示す材料には、PZTを代表する圧電セラミックとPVDFを

表-2 超音波検査法における波の種類と主な用途

検査方法	波の種類	主な用途
垂直法	縦波	内部欠陥の探傷、厚さ測定、材料特性評価
垂直法	横波	内部欠陥の探傷、音響異方性の測定（音弾性）
斜角法	横波	底面の探傷、溶接部の探傷、TOFD探傷
表面波法	表面SH波 漏洩レイリー波 クリーピング波	表面欠陥の探傷、異方性の測定、疲労損傷の測定 腐食検査、表層部の特性評価
板波法	SH波、ラム波	薄板や管の探傷、剥離や堆積物の検査
非線形法	縦波、横波	応力腐食割れ（SCC）やマイクロクラックなど閉口き裂の探傷

代表とする圧電高分子がある。前者は、超音波探触子としての感度が高いという特徴を有し、後者は広帯域な周波数特性を有しているため単パルス超音波による高分解能な計測が可能である。超音波を応用する場合には、まず発生させる超音波の種類を選択し、入射効率や周波数帯域を考慮して振動子材料や探触子構造を選択する必要がある。この後の章で概説する表面SH波を使った音弾性では探触子構造を工夫することで、高精度な応力測定を可能にした。

### 3. 表面SH波音弾性法による非破壊ストレス測定

#### (1) ストレス（応力）測定の必要性

人は健康を害したりストレスを感じたりすると、すぐに顔色に現れるため、他人が気づいて気遣いをしてもらえる。しかし、橋梁や鉄塔などのインフラ構造物は、力の不均衡や局所的な負荷などによって健全性を欠いても、その様子がすぐに表には現れることがない。もし、ストレスが生じているのを気付かずこれらのインフラ構造物を供用し続けると、地震、台風などの自然災害、さらに地盤沈下などの外力が働いたときにはより大きく変形が生じ最悪な場合は倒壊することがある。したがって、構造物の健全性を定期的に調べるのが重要であり、部材取替や建て替えなどの適切なメンテナンスの検討に際しても構造物の構成部材に作用している現時点での応力評価を正確に行う必要がある。すなわち、力の不均衡が働いて倒壊の可能性があるかどうか、早急に補修が必要かどうか、そして安全に補修が行えるかどうかなどを判断し、補修に対する最適な工法を選択することが大変重要である。また、補修後も適切に補修が完了したかどうかの確認も応力評価により確認することも忘れてはならない。ところが、これまでその場の応力を在姿状態（解体することなくそのままの状態）で非破壊評価する実用的な装置は開発されていないのが現状である。

#### (2) 表面SH波音弾性法

一般的な応力測定法として歪みゲージ法があるが、この方法は歪みゲージを貼り付けてからの応力値の変化しか測定できない。つまり、その場の残留応力は測定できない。その場の残留応力値を知るためには、負荷応力を除去した後に歪みゲージを貼り付けて一度測定を行い、その後その箇所を切り出して再測定（つまり破壊試験）を行う必要がある。また、X線回折を利用した方法は非破壊での応力測定が可能であるが、放射線を使うが故に取扱が容易ではなく、計測できる応力の範囲も被検体表面からわずか数 $\mu\text{m}$ の深さのごく表層部分に限られる。

一方、応力を非破壊で測定する方法に、応力状態により超音波の伝搬速度がわずかに変化する現象を利用した音弾性法がある<sup>4)</sup>。音弾性法の一つに、図-1に示すような、表面に平行で伝搬方向に対し垂直に振動する表面

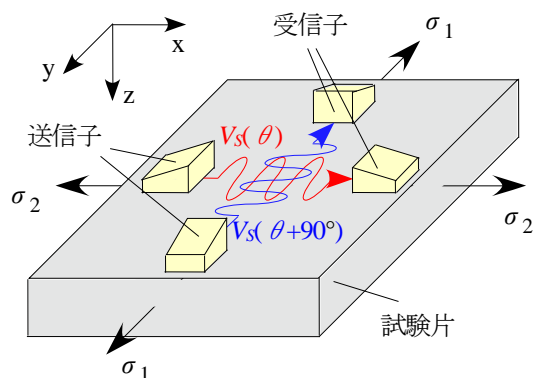


図-1 表面SH波音弾性法。

SH波を用いた音弾性法がある。これは、直交異方性を有する圧延鋼板に表面SH波を互いに垂直な方向に伝搬させるとき、材料の直交異方性の軸と主応力方向が一致する場合には、これらの音速差と主応力差（ $\sigma_1 - \sigma_2$ ）が比例するという次式の表面SH波音弾性法則を利用するものである。弱い直交異方性を有する材料が平面応力状態にあり、圧延方向と伝搬方向のなす角 $\theta$ が $0^\circ$ 、つまり圧延方向、主応力軸、及び伝搬方向がそれぞれ一致するとき、伝搬方向が互いに直交する二つの表面SH波の相対音速差は、

$$\Phi_S(0^\circ) = \frac{V_S(0^\circ) - V_S(90^\circ)}{V_{S0}} = C_S(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (1)$$

$$C_S = -\frac{1}{2\mu} \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 $\Phi_S(0^\circ)$ は圧延方向と主応力方向が一致した場合の音響異方性、 $V_{S0}$ は $V_S(0^\circ)$ と $V_S(90^\circ)$ の平均値、 $V_S(\theta)$ は $\theta$ 方向に伝搬する表面SH波の伝搬速度、 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ は主応力、 $C_S$ は表面SH波音弾性定数である。式(1)から音響異方性は表面SH波音弾性定数と主応力差の積で与えられ、組織異方性の項は含まれない。このように表面SH波を用いる表面SH波音弾性法では、複屈折音弾性法（偏向方向が互いに直交する二つの横波を材料の厚み方向に伝搬させてその音速差から応力を評価する方法）で問題になる組織異方性の分離問題から開放され、材料の組織異方性の大きさや方向が未知であっても、原理的に主応力方向と主応力差の測定が可能である。表面SH波音弾性法では、材料表面からおおよそ1波長の層の平均応力を測ることができる。

#### (3) T形表面SH波センサ<sup>5)</sup>

表面SH波音弾性法は、材料の組織異方性の影響を全く受けずに応力測定が可能であるが、表面SH波は開口面に平行に振動する横波を直接試料に入射させなければならないために粘性の高い接触媒質を用いる必要があり、接触媒質の厚みや試料表面の粗さ等の影響を受けやすい。このため、高精度音速測定が難しく、応力測定の実用化

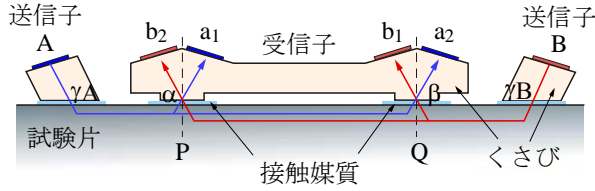


図-2 T形表面SH波センサ。

には至っていない。そこで、表面SH波音弾性法の実用化に向け、測定誤差となる接触媒質の厚みの影響を軽減させる方法として図-2に示すT形表面SH波センサを新たに考案した。

T形表面SH波センサとは二つの送信子、四つの受信子を用いて双方向送受信を行うことにより、接触媒質の厚み変化による誤差を軽減し、高精度な伝搬時間の測定を可能にしたセンサである。振動子には横波用PZT振動子を用い、くさびには耐摩耗性が高いポリスチレンを用いている。振動子面は鋼中に表面SH波が発生するように入射角が $20.7^\circ$ となるように傾いている。

次に、高精度伝搬速度測定の実理について説明する。センサと試験体の接触面である $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma_A$ ,  $\gamma_B$ において、接触媒質などによる遅延時間をそれぞれ $t_\alpha$ ,  $t_\beta$ ,  $t_{\gamma_A}$ ,  $t_{\gamma_B}$ とする。また、遅延時間を除いた送信子Aから受信子 $a_1$ ,  $a_2$ までの伝搬時間をそれぞれ $t_{A1}$ ,  $t_{A2}$ 、送信子Bから受信子 $b_1$ ,  $b_2$ までの伝搬時間をそれぞれ $t_{B1}$ ,  $t_{B2}$ とする。今、遅延時間を含む送信子Aから受信子 $a_1$ ,  $a_2$ までの伝搬時間 $T_{A1}$ ,  $T_{A2}$ は、

$$T_{A1} = t_{A1} + t_{\gamma_A} + t_\alpha \quad (3)$$

$$T_{A2} = t_{A2} + t_{\gamma_A} + t_\beta \quad (4)$$

となる。このとき受信子間距離での伝搬時間差 $\Delta T_A$ は、

$$\Delta T_A = (t_{A2} + t_\beta) - (t_{A1} + t_\alpha) \quad (5)$$

となる。同様に送信子Bによる逆方向の伝搬について、受信子間距離での伝搬時間差 $\Delta T_B$ は、

$$\Delta T_B = (t_{B2} + t_\alpha) - (t_{B1} + t_\beta) \quad (6)$$

となる。ここで、式(5)と式(6)の平均をとると、受信子間距離の平均伝搬時間 $\Delta T$ は、

$$\Delta T = \frac{\Delta T_A + \Delta T_B}{2} = \frac{(t_{A2} - t_{A1}) + (t_{B2} - t_{B1})}{2} \quad (7)$$

となり、最終的には、接触媒質などによる遅延時間 $t_\alpha$ ,  $t_\beta$ ,  $t_{\gamma_A}$ ,  $t_{\gamma_B}$ は消去され、接触媒質の厚み変化の影響を受けずに高精度な伝搬時間の測定を行うことが可能である。

#### (4) T形表面SH波センサの性能

T形表面SH波センサを用いた音弾性応力評価システムの概略図を図-3に示す。このシステムは、シングアラウンド法による音速測定を基本としている。シングアラ

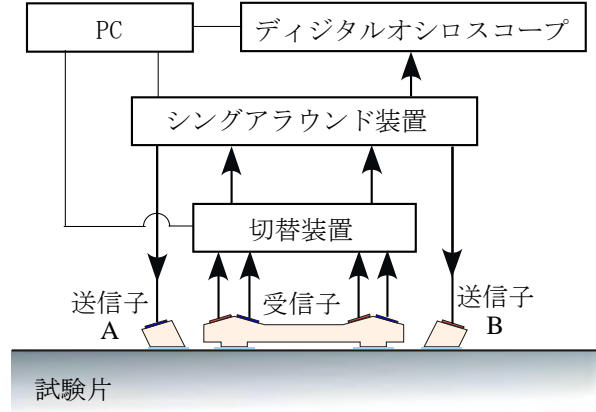
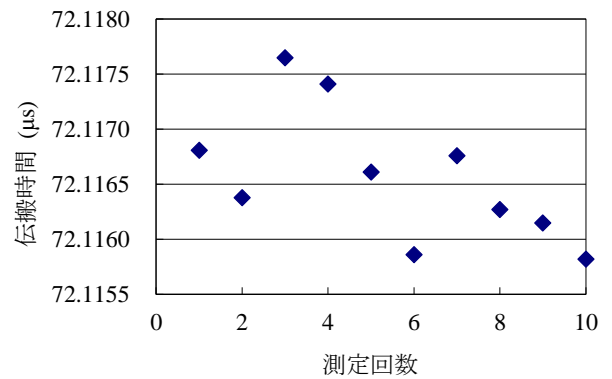
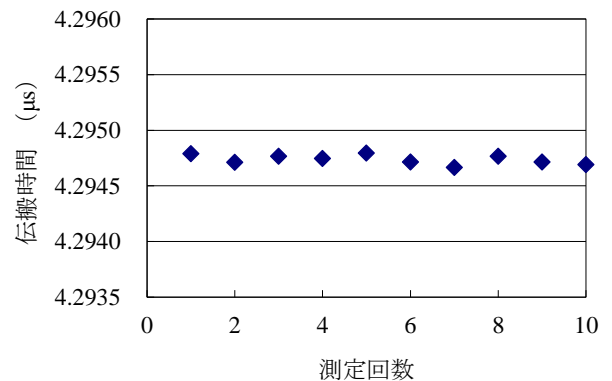


図-3 T形表面SH波センサを用いた音弾性応力測定システム。

ウンド法とは、送信・受信を多回数繰り返し、その都度得られる伝搬時間の積算値から伝搬時間の平均を求める方法で、センサの変換特性の変動や受信信号のノイズによる誤差を軽減し、高精度な音速測定が可能である。実際の応力測定では1万回の積算を行い、10ピコ( $\times 10^{-12}$ )秒(これは、光がわずか3mm進むのに要する時間に相当)のオーダーまで伝搬時間を計測している。なお、表面SH波用カップラントには、ソニコートSHN-B25を使



(a) 受信子a1のみで測定した時の伝搬時間 $T_{A1}$



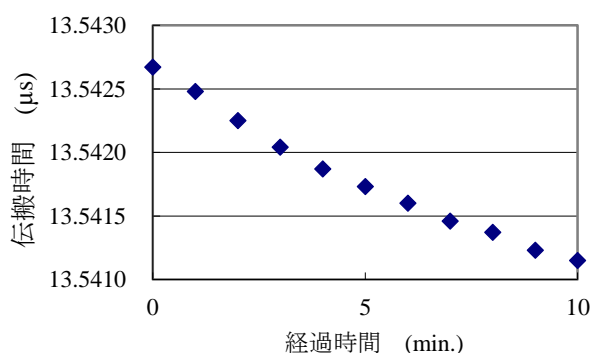
(b) 4つの受信子で測定したときの平均伝搬時間 $\Delta T$

図-4 接触状態による音速測定の再現性。

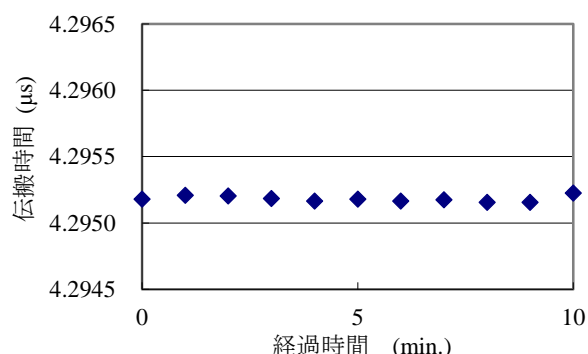
用する。

開発した T 形表面 SH 波センサの性能について、以下に述べる。いずれも、軟鋼 SS400 圧延板から圧延方向を長手方向に合わせて切り出したものを試験片としている。まずは測定の実現性について示す。T 形表面 SH 波センサを設置し、また再度取り外して設置し直し、センサ接触面の接触媒質の状態を変化させた。この動作を 10 回繰り返し、伝搬時間測定の再現性を調べた。T 形表面 SH 波センサの送信子 A から入射し、受信子 a1 のみで測定した時の伝搬時間  $T_{A1}$  (式(3)参照)を図-4(a)に、送信子 A、B から入射し、4 つの受信子で測定したときの平均伝搬時間  $\Delta T$  (式(7)参照)を図-4(b)にそれぞれ示す。これらの図の比較からわかるように、受信子 a1 のみ測定した場合よりも四つの受信子を用いた時の方が測定誤差は小さくなった。以上のことより、T 形表面 SH 波センサでは接触媒質の厚みなど接触状態による影響を軽減でき、再現性の高い音速測定が可能である。

次に接触媒質の影響について示す。表面 SH 波音弾性法では、粘性の高い接触媒質を用いなければならないため、センサを設置後、音速が安定するまで待つ必要がある。そこで、従来型である一対の SH 波センサと T 形表面 SH 波センサを用いて、設置後の時間経過による圧延方向の音速変化を調べた。それぞれの結果を図-5に示す。従来型の SH 波センサ(図-5(a)参照)では、接触媒質の膜厚が時間経過と共に薄くなり、音速が増加した。一方、



(a) 従来型表面 SH 波センサ



(b) T 形表面 SH 波センサ

図-5 伝搬時間測定における時間経過の比較

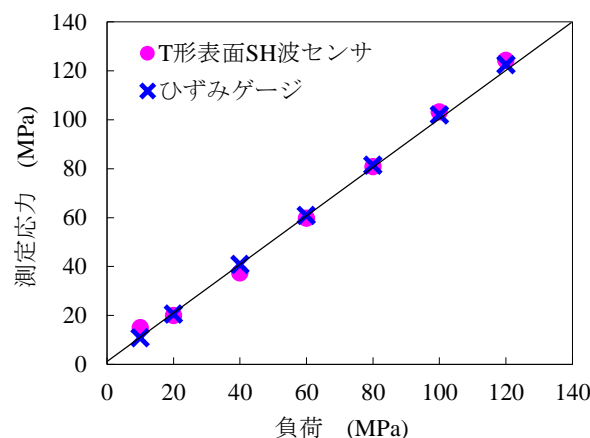


図-6 ひずみゲージと表面SH波音弾性による応力測定と比較

T 形表面 SH 波センサ(図-5(b)参照)では、時間経過による大きな変化は見られなかった。従って、T 形表面 SH 波センサでは、音速測定において接触媒質の状態が安定するまで待つ必要がなく短時間での測定が可能であると考えられる。

最後に、万能試験機(島津製作所 UH-FA500kN)を用いて試験片の圧延方向に 10~120MPa を負荷し、T 形表面 SH 波センサを用いた応力測定の信頼性について示す。試験片の圧延方向を 0°とし、偏向方向 0°, 90°の音速を交互に測定し、その都度得られる音速から応力を求めた。真の応力は、センサ設置面裏側に貼り付けたひずみゲージを用いて測定した。その結果を図-6に示す。万能試験機で約 120MPa の負荷を与えたとき、ひずみゲージ測定値 125.8MPa に対し、音弾性測定値は、123.4±4.6MPa であり、ひずみゲージ法を基準とした場合の誤差は 5MPa 以下となり、その標準偏差は 2.2MPa であった。この結果からも、T 形表面 SH 波センサの有用性が実証された。また、T 形表面 SH 波センサの音速の測定精度は、0.1 m/s 以下となり、約 5 MPa の精度で応力測定が可能であることも併せて確認できた。

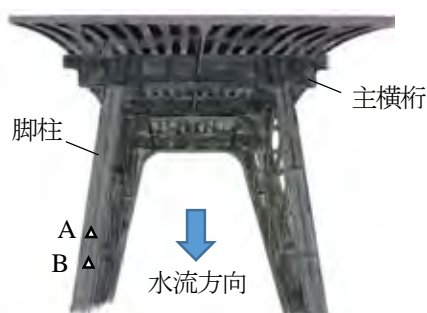
## (5) 実構造物の応力測定への適用

水力発電用ダムの洪水吐ゲートにおける実応力測定では、水圧荷重による発生応力のみ測定に留まっている。部材ならびに構成品を整形や組立時に発生する残留応力の測定は、全発生応力に占める残留応力の影響を定量的に把握するためには不可欠である。しかしながら、これまで残留応力を非破壊的に測定・評価する実用的な装置がなく、評価されていないのが現状である。そこで、一定の管理水準を超え、取替えを実施した水力発電ダム用洪水吐ゲートの旧ゲート解体品を使用し、従来手法であるひずみ法(ひずみゲージ法)で残留応力の測定を行うと同時に、応力状態を非破壊的に測定可能な表面 SH 波音弾性法による応力測定を実施した。対象ゲートは図-7に示すような鋼製ラジアル式ゲートであり、経年劣化に





(a) ラジアル式ゲートを用いた発電ダム



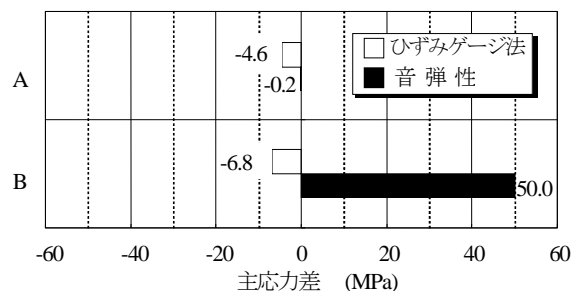
(b) 洪水吐ゲート（上から見た図）

図-7 ラジアル式洪水吐ゲートにおける応力測定箇所

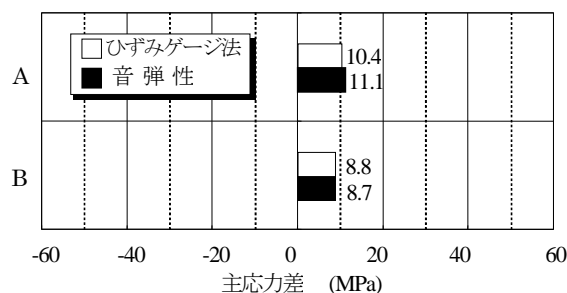
伴って、主桁・脚柱では腐食が特に激しく、扉体各部品での計算応力が管理基準を超過していた。主横桁および脚柱において複数箇所主応力方向（流水方向を0°方向）とその直角方向（90°方向）の二方向での音速を測定し、主応力差を求めた。例として、図-7(b)に示す測定箇所AおよびBにおける測定結果を図-8に示す。ここで、残留応力は水位をゼロにした状態で測ることができる材料内部に残留する応力であり、水位差応力はダム水位を変化させたときの応力変化を示している。今回の実構造物での応力測定では、ひずみ法による結果と比較すると大きな差異がある箇所がいくつかあった。この原因として、経年劣化によりゲート表面が激しく孔食し、測定表面を均一に面出し出来なかった（前処理が不十分）ことが挙げられる。また、計測時における計測要員の配置や計測場周辺で別の作業も行っていた関係でゲートの荷重状態が変化したことも懸念される。現在、短時間に平面・平滑化が可能なフリース式ポータブル研磨装置を開発している。今後は、この研磨装置を現場に適用し、表面SH波音弾性の有用性を実証していく予定である。

#### 4. おわりに

高度経済成長期に建造されたインフラ構造物の老朽化が大きな社会問題となっている今、定期的な検査を行うことで健全性を保ち、安全に供用することが大変重要である。超音波検査技術は構造物を非破壊で内部の健全性



(a) 残留応力



(b) 水位差応力

※ 測定軸方向引張（脚柱：流水方向）を正（符号：+）としている

図-8 応力測定結果の比較

を評価する技術として注目されている。表面SH波音弾性法は鋼構造物を在姿でその場の応力を測定するのに有用な技術であるが、接触媒質の影響を強く受け、これまで実用的な計測が困難であった。新たに開発したT形表面SH波センサはこの影響を除去することが可能であり、約5 MPaの精度での応力測定を実現した。水力発電ダムの洪水吐ゲートにおける実証実験でもその有効性が確認された。同時に測定面の簡便かつ短時間での平滑化処理が課題であることがわかった。今後は、この問題に取り組みながら実用化を目指したい。同時に、鉄道レールの軸応力測定、鉄塔や配管などの応力測定にも適用し、維持・管理や災害時の減災に貢献したいと考える。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省編：トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会報告書, 2013.
- 2) 国土交通省編, 国土交通白書2015 [平成26年度年次報告], 2015.
- 3) 和歌山県道路橋長寿命化修繕計画, 2014.  
<http://www.pref.wakayama.lg.jp/prefg/080300/tyoujumyouka.html>.
- 4) 福岡和秀, 戸田裕己, 平尾雅彦: 音弾性の基礎と応用, p.200, 1993.
- 5) Y. Murata, Y. Hashimoto, M. Ikeshita, M. Fujigaki and H. Toda: Application of an Acoustoelastic Stress Measurement System Using Grazing SH-wave to Angle Steel Construction, *Journal of JSEM*, Vol. 12, pp. S188-193, 2012.

(2015. 12. 18受付)